

GNSS妨害の低減手法の研究

令和6年（2024年）8月
修士課程2年
奥富 雄司

はじめに：研究背景

GNSSは船舶安全運航に大きく貢献

航法システムはGNSSへの依存度が増加

GNSSへの妨害や干渉は脅威



出典：
https://www.jrc.co.jp/product/jan7201s_9201s



出典：
<https://www.furunostyle.jp/jp/labo/electronics/article04/>



代表画像のみ

米国海事局 (MARAD) は、さまざまな GPS 干渉と AIS スプーフィングに関する海事勧告を発行しました。

マリン フォルテ エンタープライズ
エンドツーエンドの海洋ソリューションの提供
公開日: 2023年4月20日

+ フォロー

参照：
<https://www.linkedin.com/pulse/us-maritime-administration-marad-has-issued-advisory-gps-seetharaman>

米国海事局（MARAD）：勧告概要

- 重大な GPS 干渉の事例が海上において世界中で発生
- 安全に影響する GPS 障害への対応計画策定を推奨
- 衝突回避等の意思決定にAISのみに
依存すべきではないと勧告
- 米国沿岸警備隊の Web ページに
報告された GPS の問題の時系列リストが参照可能
<https://go.usa.gov/xMZ2q>



An official website of the United States government [Here's how you know](#)

United States Department of Transportation

U.S. Department of Transportation
Maritime Administration

Maritime Industry

About MARAD National Security Economic Security Maritime Workforce Grants & Loans Environmental Innovation

[Home](#) / [MSCI Portal](#)

MSCI Advisory

2023-013-Various-GPS Interference & AIS Spoofing

Description:

This advisory cancels U.S. Maritime Advisory 2023-005

1. Reference: None.

2. Issue: Instances of significant GPS interference have been reported worldwide in the maritime domain. This interference can result in lost or inaccurate GPS signals affecting bridge navigation, GPS-based timing, and communications equipment (including satellite communications equipment). The U.S. Coast Guard Navigation Center (NAVCEN) webpage, <https://navcen.uscg.gov/gps-problem-report-status>, contains a chronological list of recently reported GPS problems. GPS interference may also be caused by planned testing or training activities. Further information on planned outages can be found at <https://www.navcen.uscg.gov/gps-service-interruptions>, and will also be published in the Notice to Mariners.

Automatic Identification Systems (AIS) are open, unencrypted, and unprotected radio systems intended to operate on non-secure VHF-FM channels. As such, AIS signals can be spoofed, resulting in incorrect or missing AIS data.

3. Guidance: Exercise caution when underway. Plans for responding to GPS disruptions that affect safe navigation of vessels should be in place prior to getting underway. Such plans should be incorporated into company policy and safety management systems as appropriate and made readily available to vessel crew responsible for safe navigation

参照：
<https://www.maritime.dot.gov/msci/2023-013-various-gps-interference-ais-spoofing>

報告一例：ペルシャ湾

04/12/2024
11:20:00
Middle
East Time

None

USER: CALLER REPORTED A POSSIBLE CYBER SECURITY ATTACK ON THE VESSEL APL EAGLE AT THE INCIDENT LOCATION. THE CALLER STATED THEY EXPERIENCED AN ERRATIC TRACK LINE ON THE VESSELS CHART DISPLAY, THAT SEEMED TO TRY AND TAKE THE VESSEL OFF OF THEIR COURSE. THIS INTERFERENCE TOOK PLACE FOR A FEW MINUTES, AND THEN WENT BACK TO NORMAL. THIS

Unknown
Interference

海図ディスプレイに不規則な航跡線が表示され
船舶を航路から外そうとしていることを確認

この干渉は数分間発生、その後通常に戻った
この船は数か月前にペルシャ湾で同じ状況を経験
米国籍の船で登録港はデラウェア州ウィルミントン

VESSEL EXPERIENCED THIS A FEW MONTHS AGO WHILE IN THE SAME AREA. THE VESSEL IS A US FLAGGED SHIP WHO'S PORT OF REGISTRY IS WILMINGTON, DELAWARE. THE VESSEL HAS NEVER BEEN TO THE UNITED STATES, AND OPERATES IN JEBEL ALI, DUBAI. THE U.S. COAST GUARD ACTIVITIES EUROPE DOES THERE INSPECTIONS. WILMINGTON, DELAWARE WAS USED AS THE INCIDENT LOCATION, BUT THE INCIDENT ACTUALLY OCCURED AT THE COORDINATES PROVIDED IN THE PERSIAN GULF. NAVCEN: The GPS Operations Center reviewed the GPS Constellation and Control Segment, there are no known anomalies that might affect GPS signal integrity at the time and vicinity of the reported problem. Space weather was reviewed and found unlikely to have impacted GPS performance. There were no authorized GPS tests in the area. No correlating reports from inter-agency partners. No additional information.

出典 (2024年7月22日時点) :

<https://navcen.uscg.gov/gps-problem-report-status>

目的

GNSS への妨害を軽減する方策の提案

アンテナレベルでの軽減

『指向性のあるアンテナの試作及び評価』

信号処理レベルでの軽減

『ノイズキャンセルの手法の試行』



画像引用元：
<https://www.maritimeglobalsecurity.org>

1. はじめに（研究背景）

2. 目的

3. 妨害再現実験

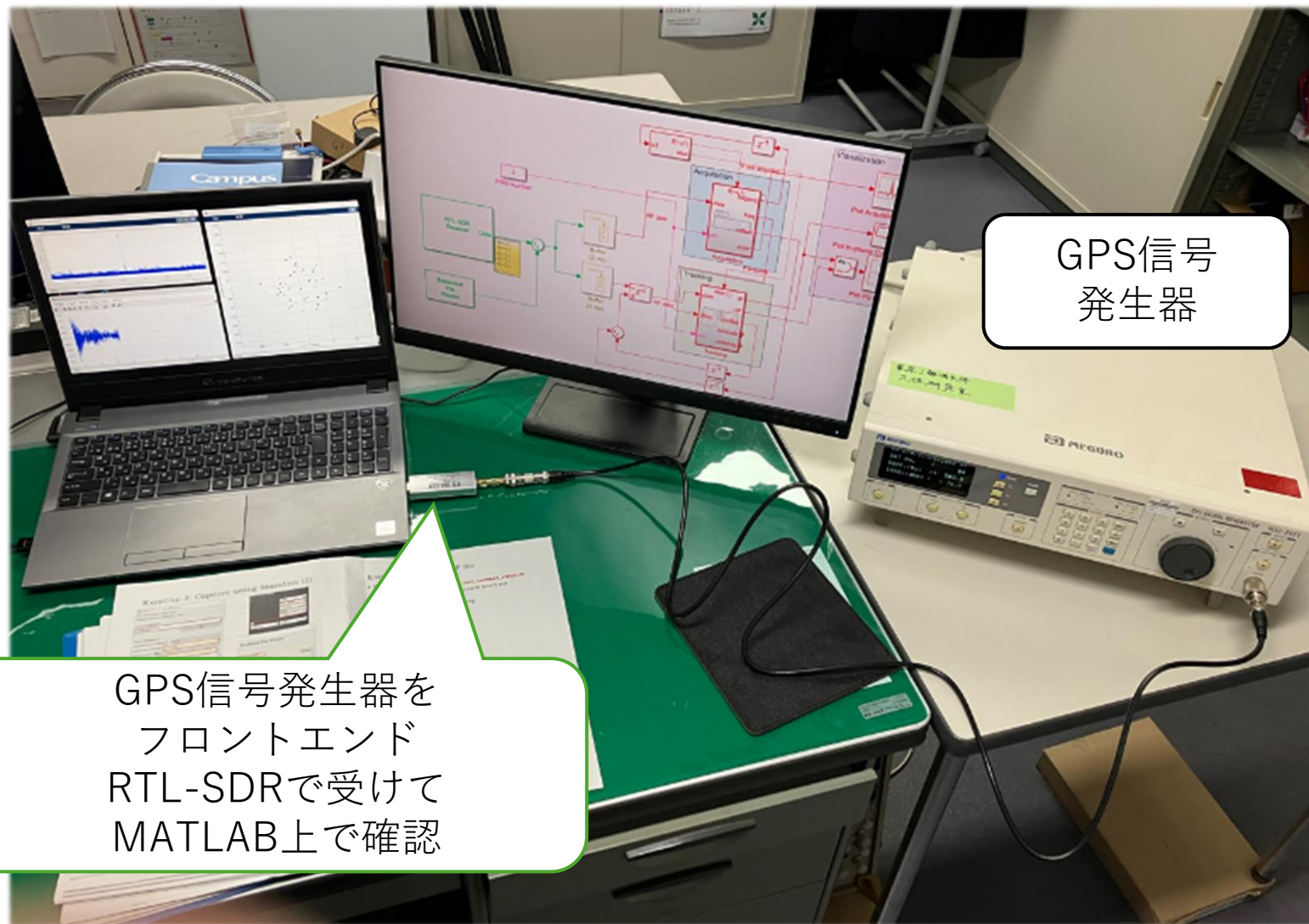
4. アンテナレベルでの軽減方法

5. 信号処理レベルでの軽減方法

6. まとめ

RTL-SDRでの妨害信号の確認 (妨害現象のメカニズムを検証)

GPSシミュレータ信号
を妨害信号として入力



GPS信号
発生器

GPS信号発生器を
フロントエンド
RTL-SDRで受けて
MATLAB上で確認

妨害信号を混合しない

妨害信号
の入力

2
PRN Number

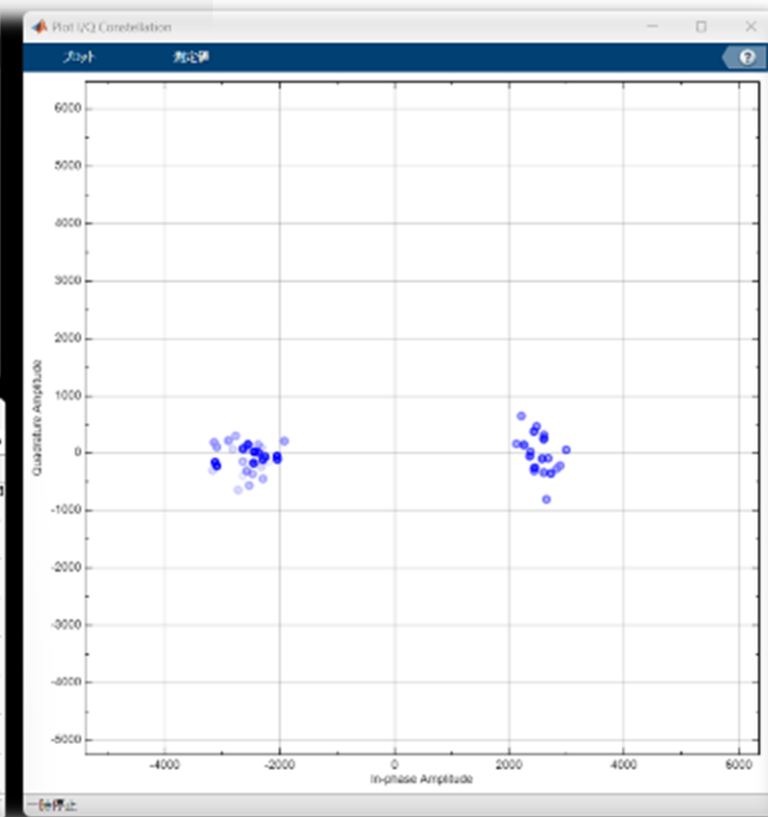
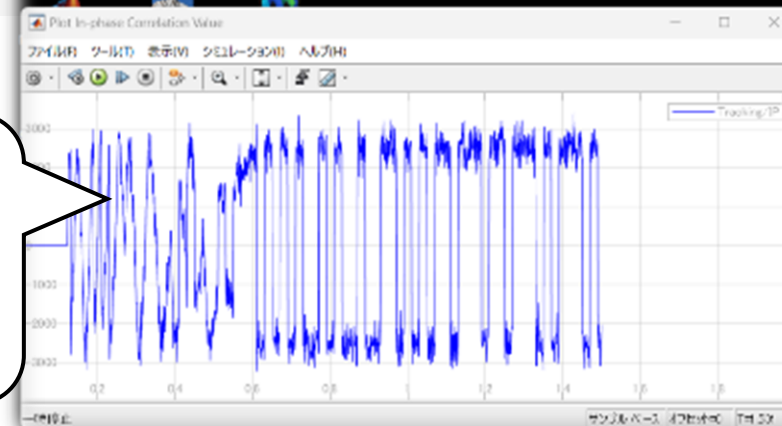
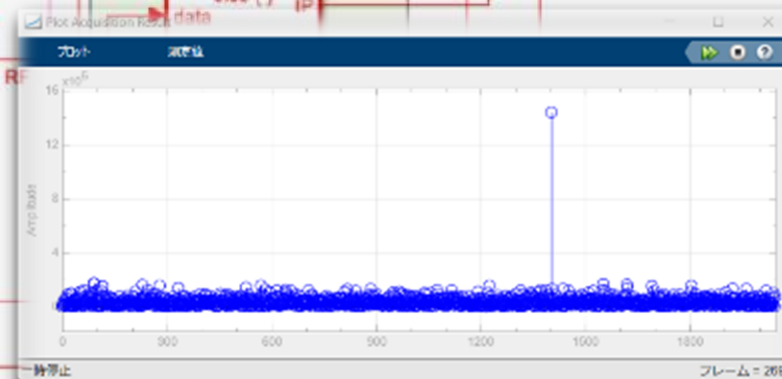
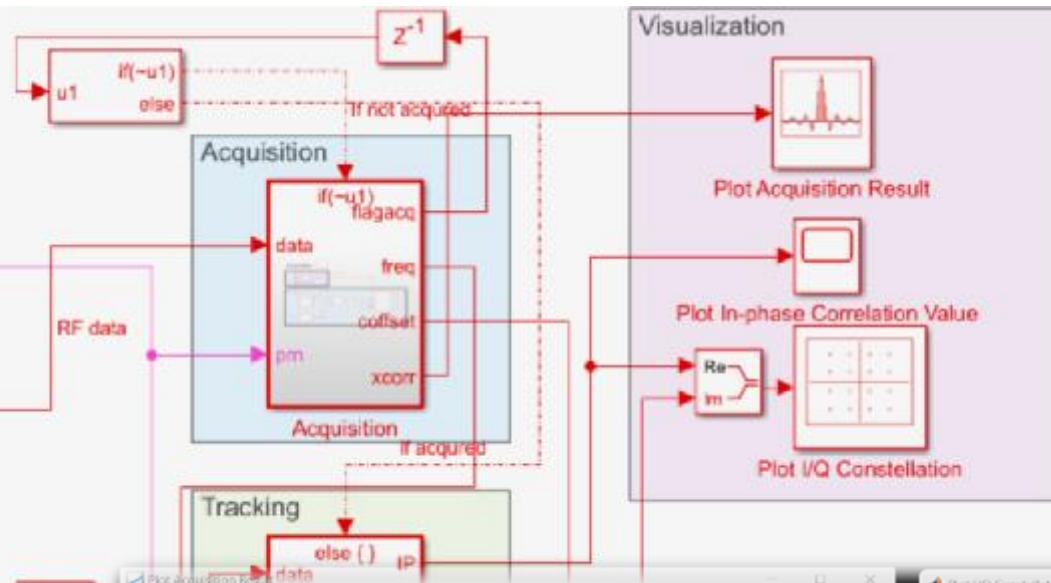
RTL-SDR
Receiver



保存してあるGNSS信号
ベースバンドファイル

【ベースバンドファイルの復調】

妨害信号の混合がない場合
デコードできることを確認



妨害信号の混合あり

2
PRN Number

RTL-SDR
Receiver

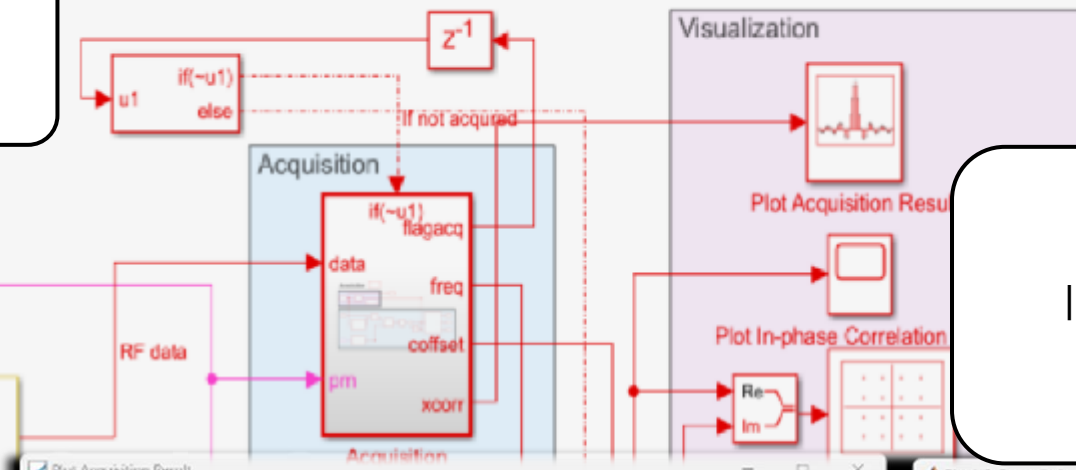
Data

-1-11
-1-11
-1-11
-1-11
-1-11
...

Baseband
File
Reader

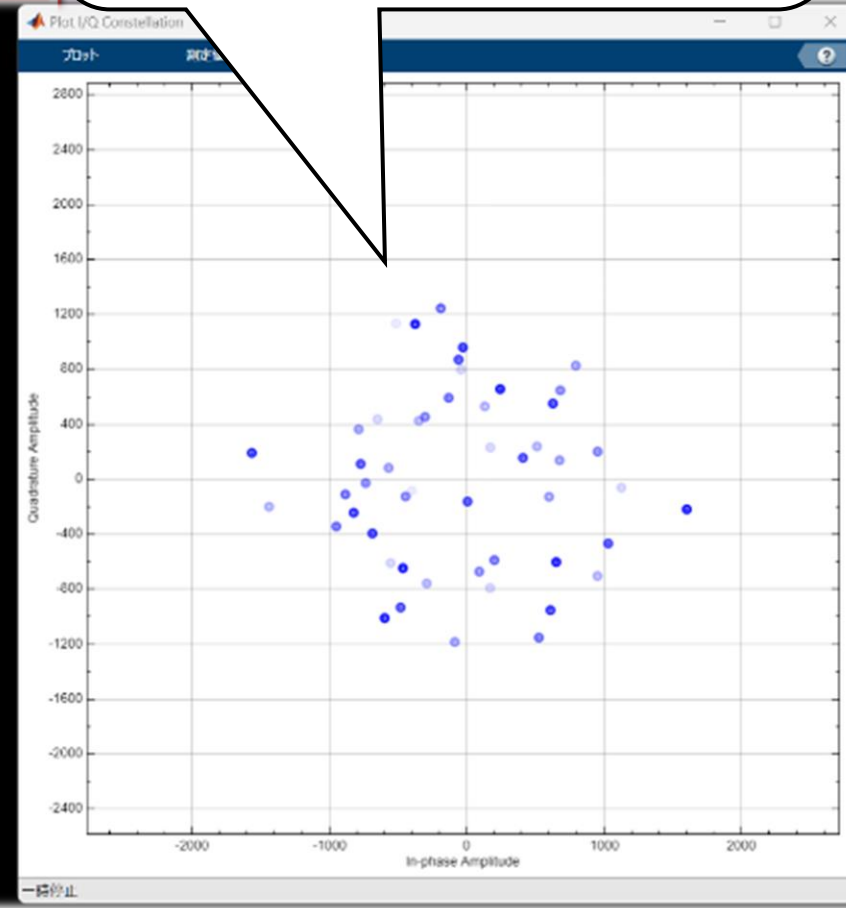
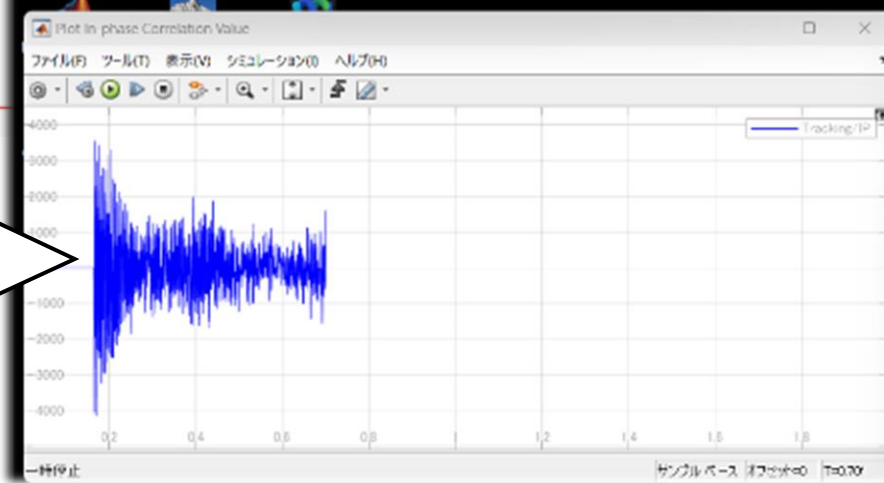
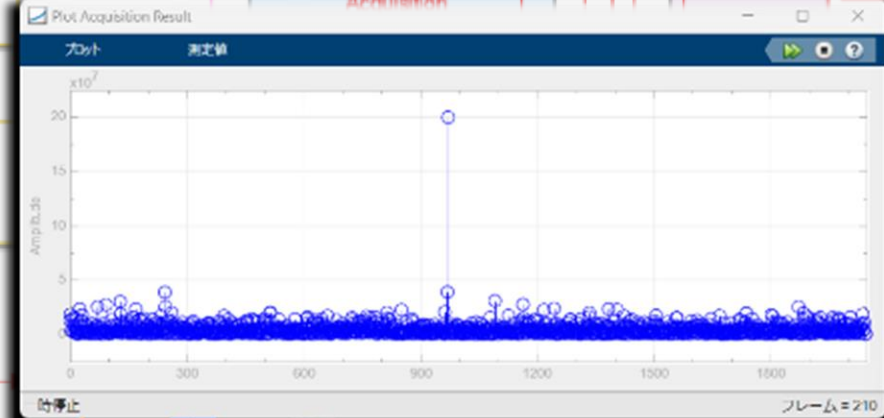
Buffer
(2 ms)

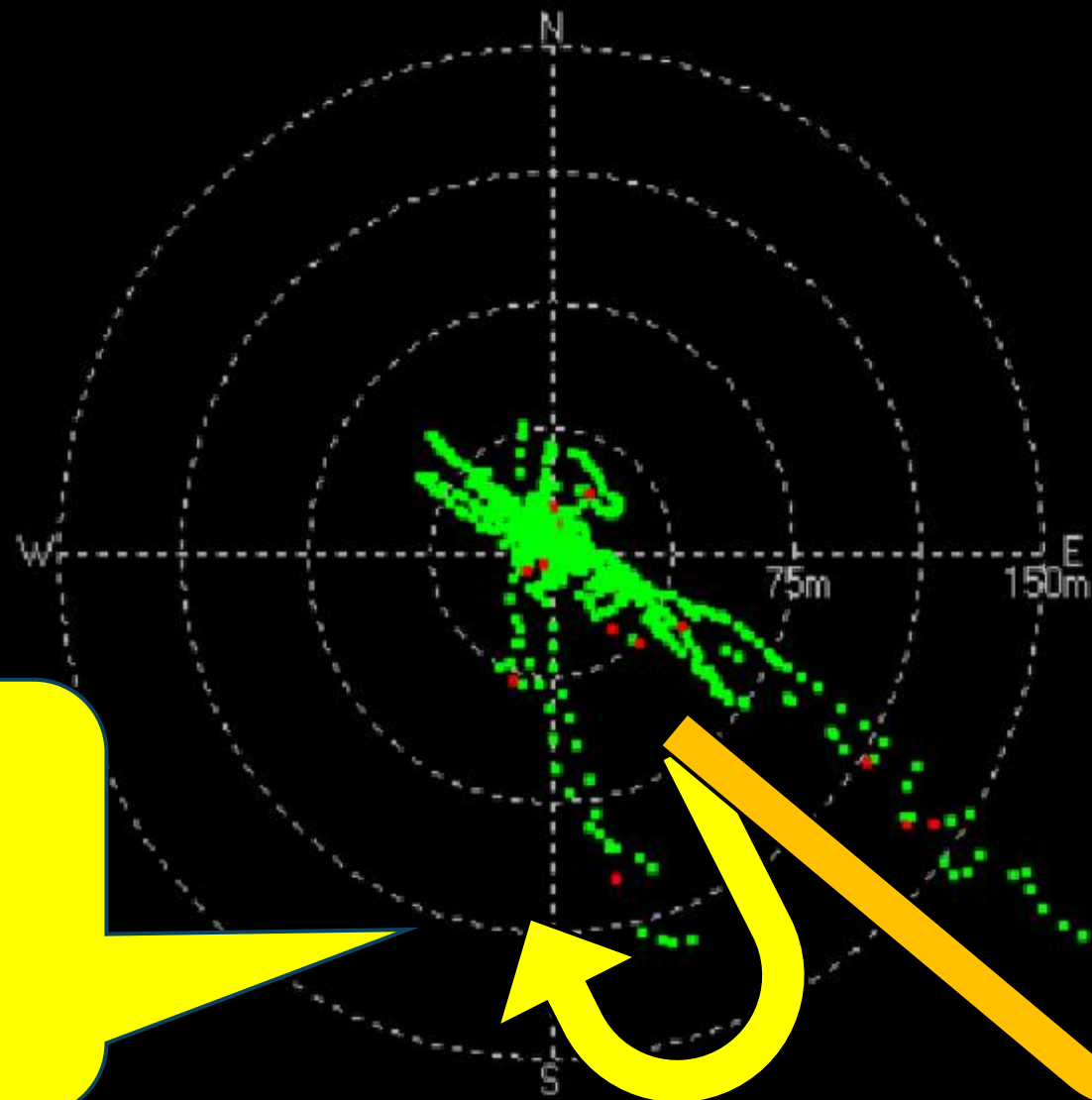
Buffer
(1 ms)



信号を混合した場合
I/Qコンステレーションが
乱れてデコードできない

【ベースバンドファイルの復調】
復調できない
妨害信号による測位不能の発生





ジャミングを与えると
100mほど離れる

ジャミングを止めると
正しい位置に戻るように
プロットされる

強いジャミング
を与えた場合
距離がずれていき
やがて
No Fixとなる

34.72380600— 135.31502533—

MQTT client: Not connected | u-blox 6 | COM3 9600 | No file open | NMEA | 00:44:15 | 10:31:38



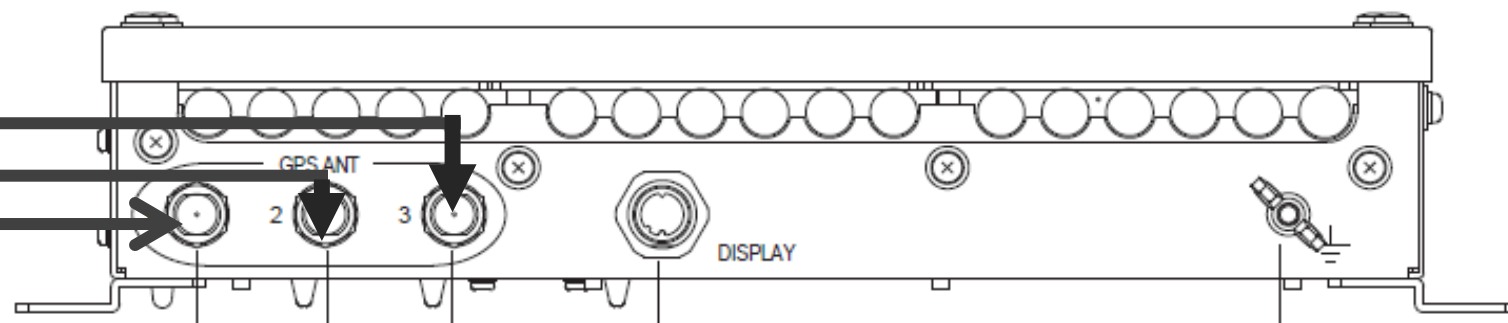
MATLABで試したことを舶用機器に試す フルノコンパスへの妨害信号の接続図

ANTENNA UNIT
SC-303

サテライトコンパス演算部

GPS
信号発生器
(妨害)

分波器



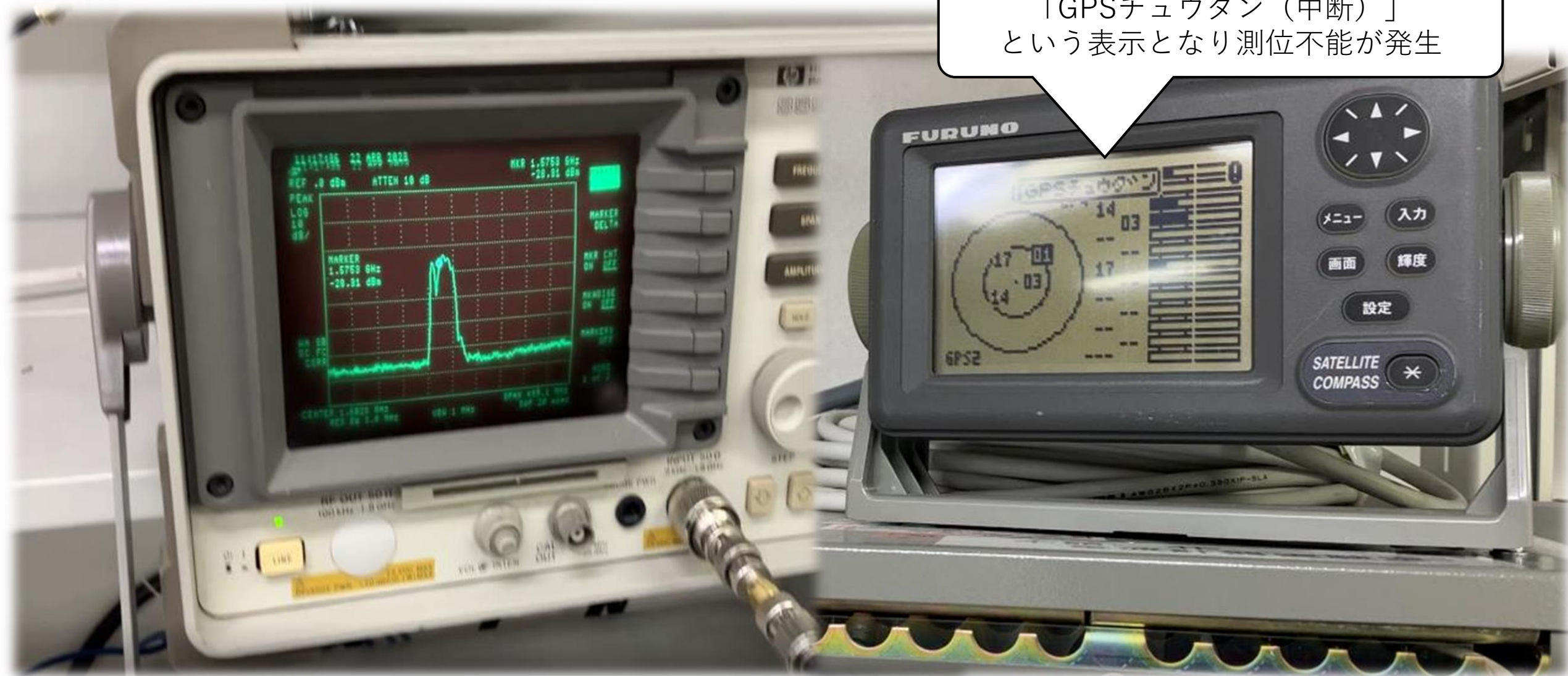
ANTENNA Terminals
GPS ANT1: No color
GPS ANT2: Yellow line
GPS ANT2: Red line
(using cable TPPX6-3D2V-15M)

Cable from display

Ground Terminal
Connect IV-2.0 sq
ground wire to
ship's superstructure.

測位不能：-28dBmで発生

「GPSチュウダン（中断）」
という表示となり測位不能が発生

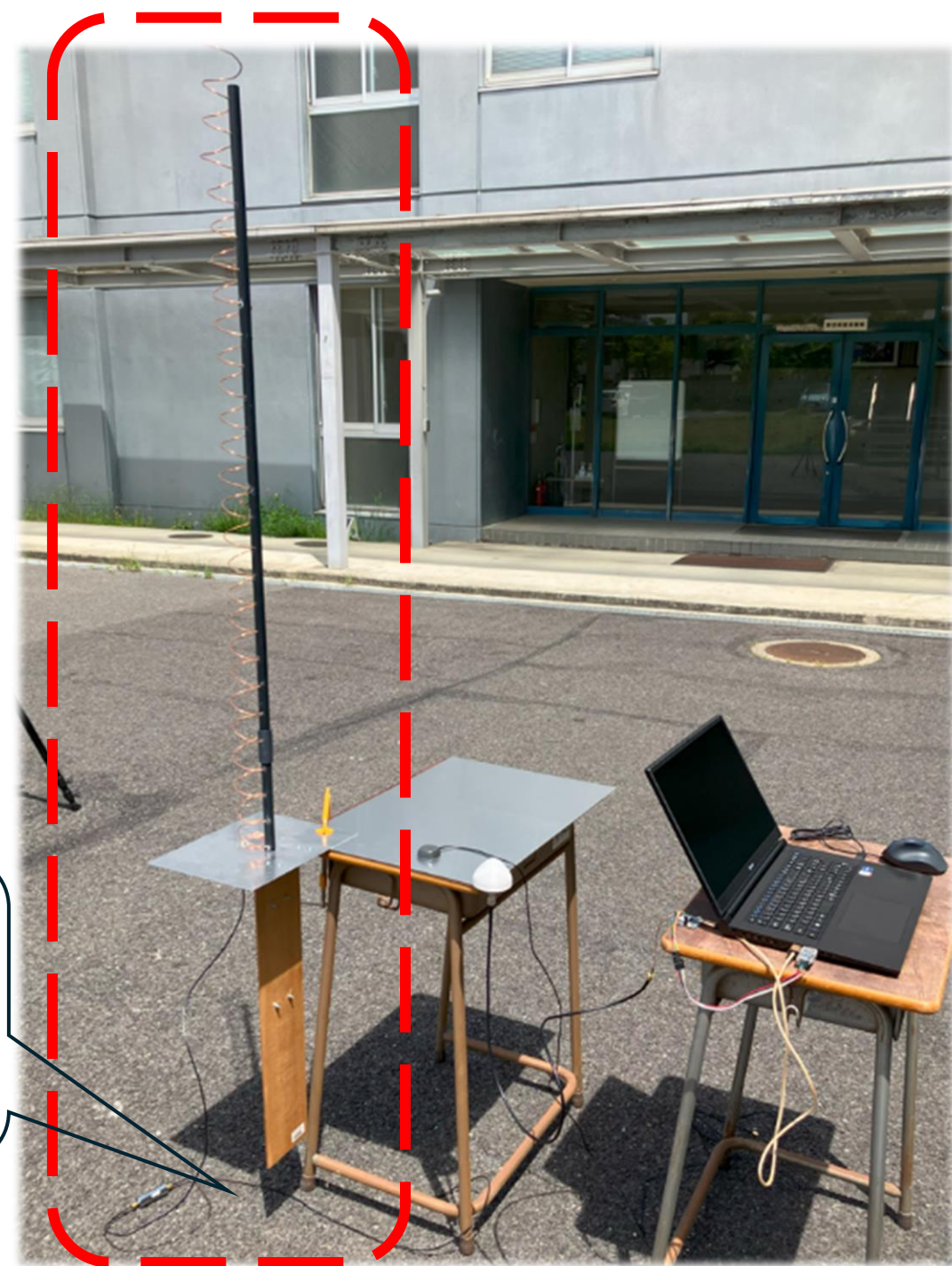


1. はじめに（研究背景）
2. 目的
3. 妨害再現実験
4. アンテナレベルでの軽減方法
5. 信号処理レベルでの軽減方法
6. まとめ

試作アンテナ諸元

コイルの巻き数	28巻
1 回巻部分の周囲長さ (cm)	19cm
ヘリカルの円形断面の直径 (cm)	6.1cm
1 回巻部分間の距離 (cm)	4.8cm
アンテナ部分の長さ (cm)	134.4cm
GNDプレーン寸法 (縦x横cm)	20cm x 20cm

LNAの代用として
インラインAMP
25dBを使用



ヘリカルアンテナ部材と作業工程

物品	寸法など	個数	入手先
銅線	太さ 2 mm x 5m	1	ホームセンター
塩ビパイプ	1 m	1	//
塩ビパイプ継ぎ手	-	1	//
アルミ板	225*300	1	//
L字金具	-	2	//
U字金具	-	2	//
BNCコネクタマウント	-	1	マルツパーツ
ビス	-	1 式	//
ナット	-	1 式	//
ノギス	-	1	//
板材	10 c m x 50 c m	1	//
接着剤	-	1	//



寸法計測
印付け



パイプ穴あけ
加工



銅線を通す
コイル成形



コネクタ部分
の接合

アンテナ製作の動機と狙い

1. アンテナを安価に入手したい
2. 既製品よりも鋭いビーム幅のアンテナがほしい

$$\text{ビーム幅（半値幅）} \simeq \frac{52 \lambda^{3/2}}{\pi D \sqrt{NS}}$$

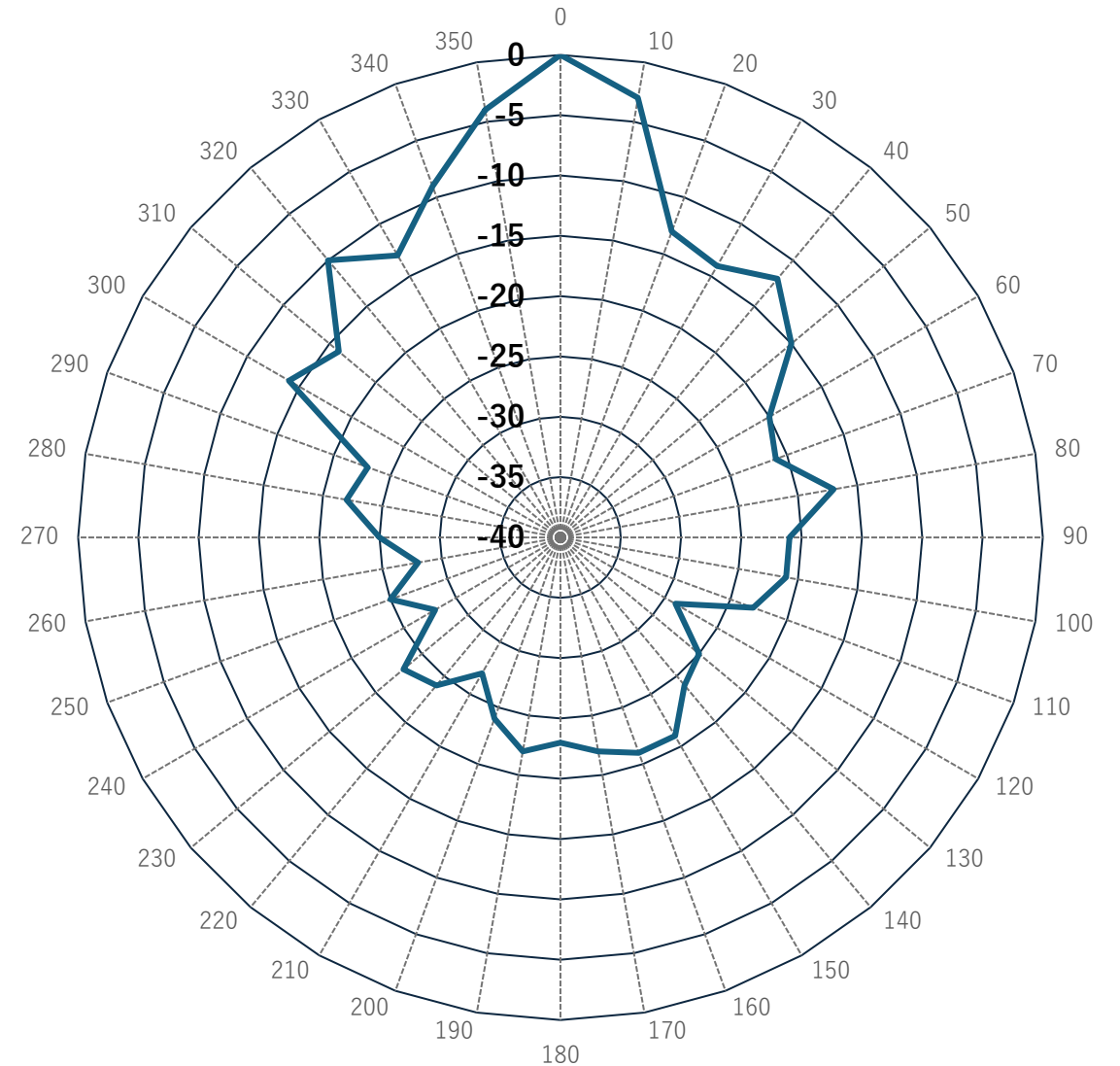
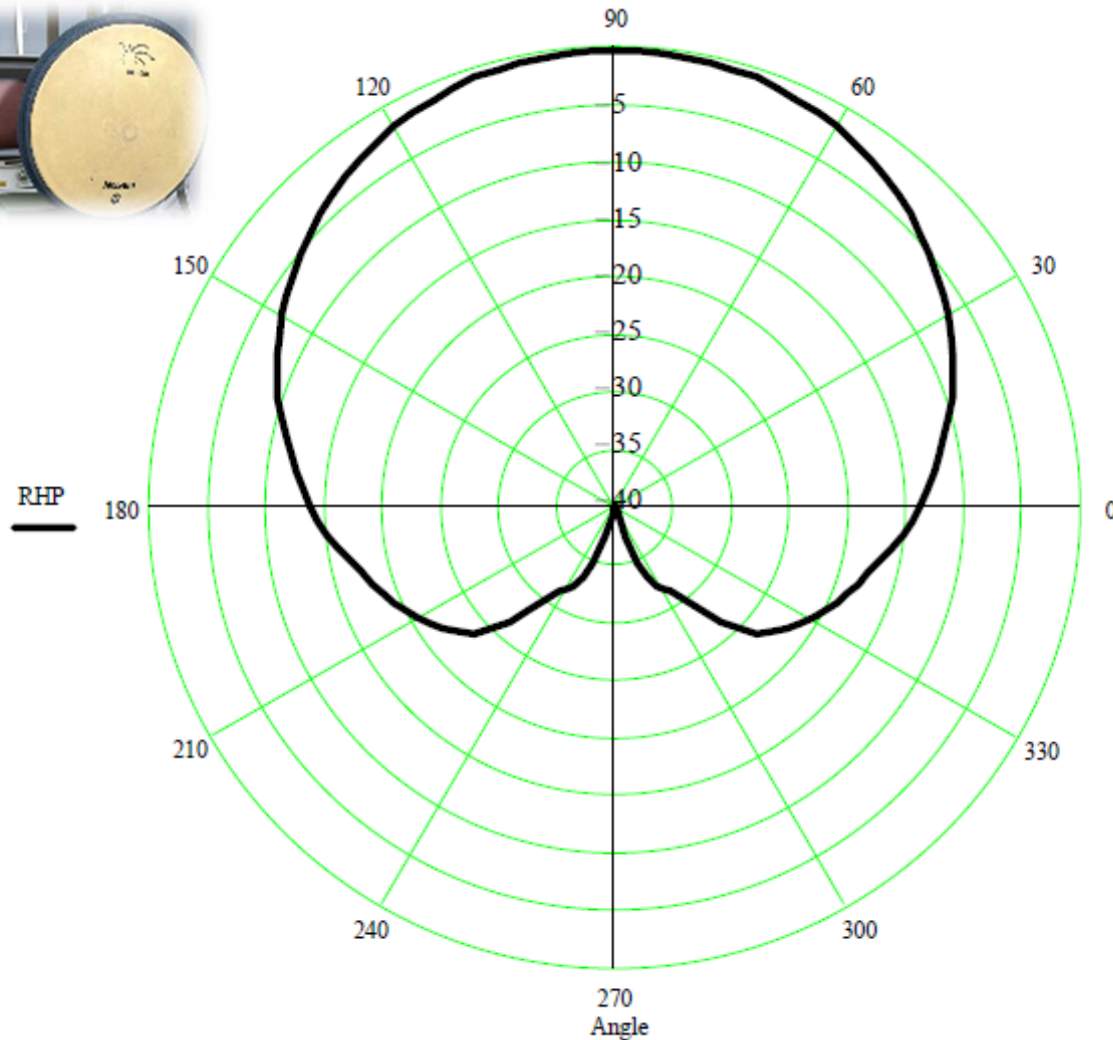
λ : 波長 D : コイル直径 N : コイルの巻き数 S : コイル間の距離

出典：『円偏波アンテナの基礎』 福迫 武 著：コロナ社

受信アンテナと送信アンテナのパターン比較（-40 d Bレンジ）

Novatel GPS-600

アンテナカタログより抜粋

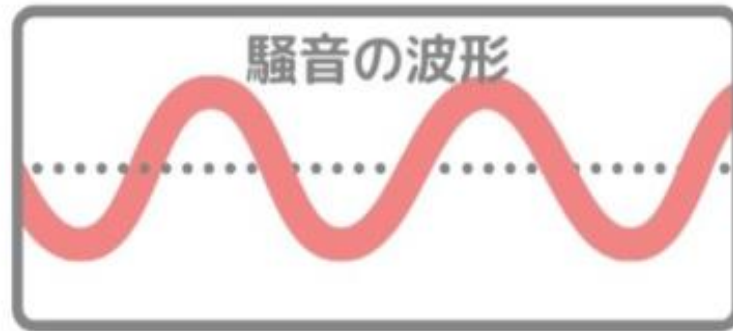


1. はじめに（研究背景）
2. 目的
3. 妨害再現実験
4. アンテナレベルでの軽減方法
5. 信号処理レベルでの軽減方法
6. まとめ

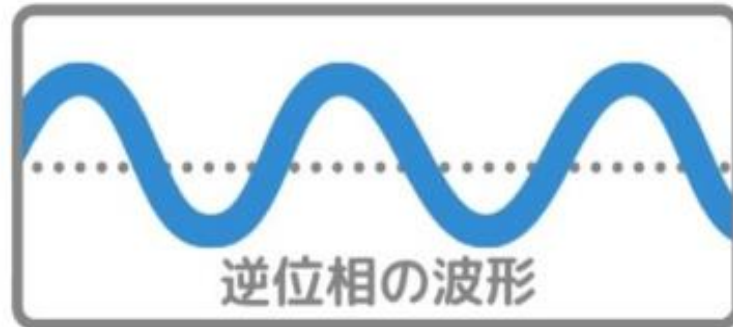
ジャミング信号だけを消せないか

ノイズキャンセルの仕組みと同様のことを試す
a concept of Noise cancellation

ジャミング信号

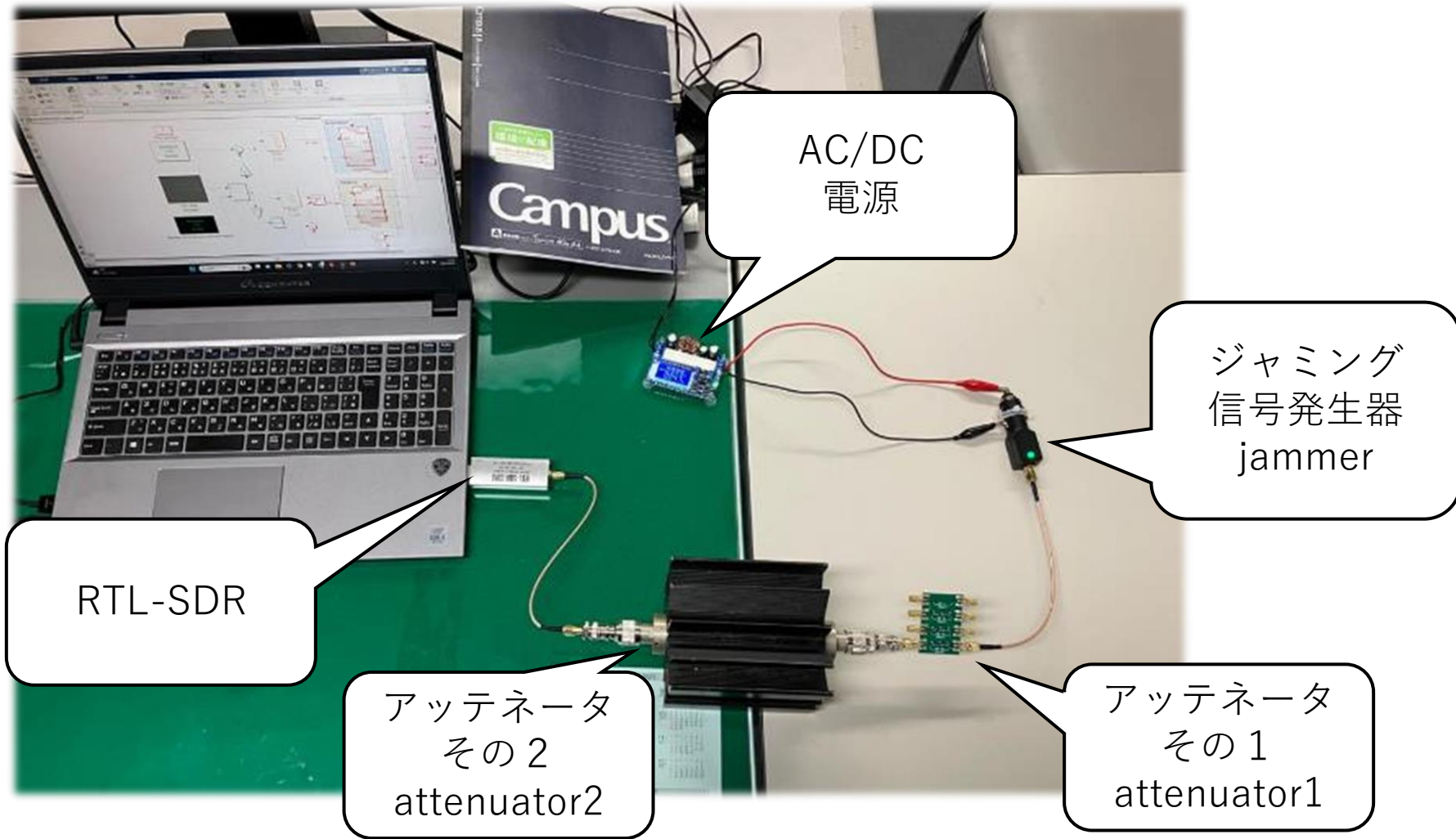


逆位相の
ジャミング信号

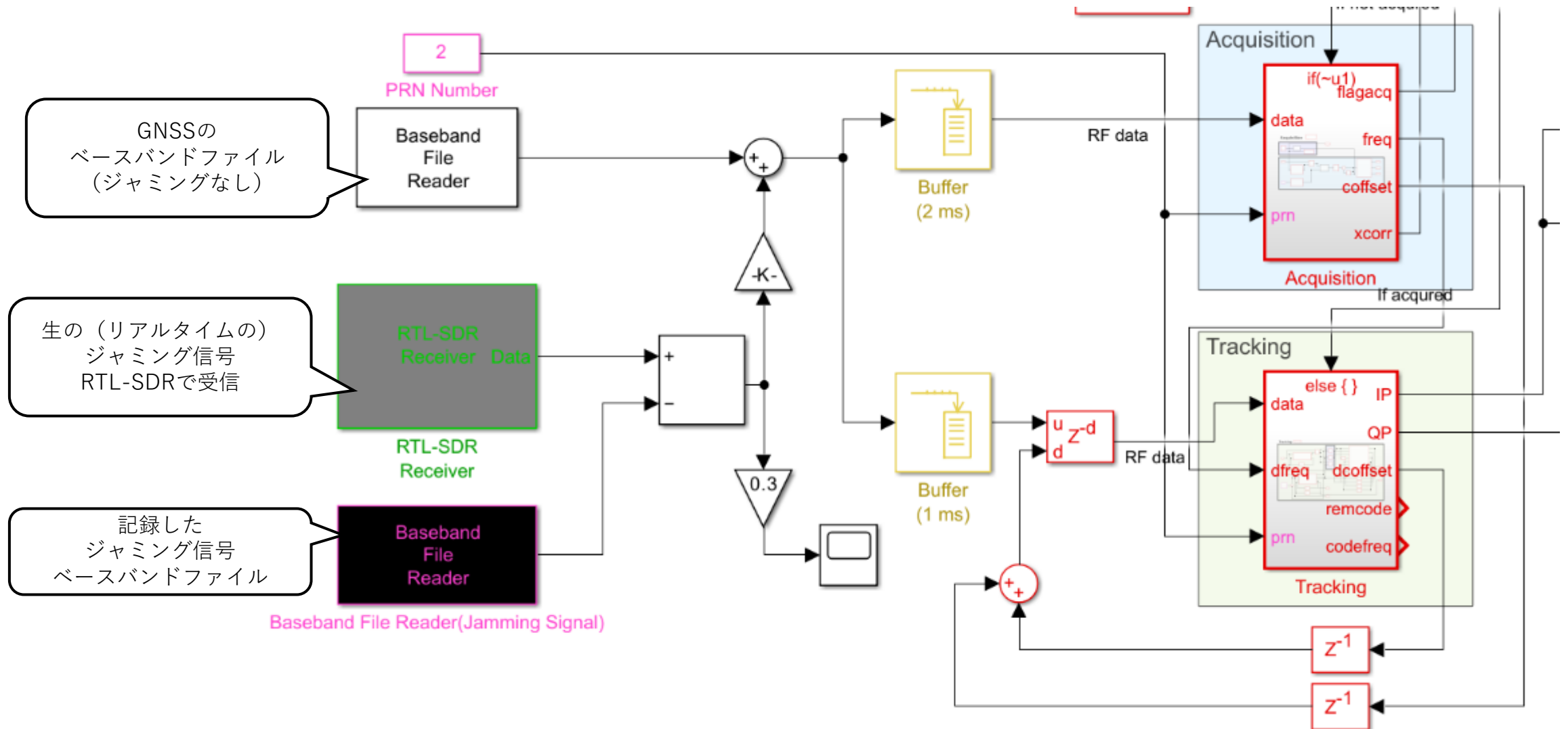


妨害波をあらかじめレコードして データベース化

ジャミング信号をSDRで受信してログファイルとして保存



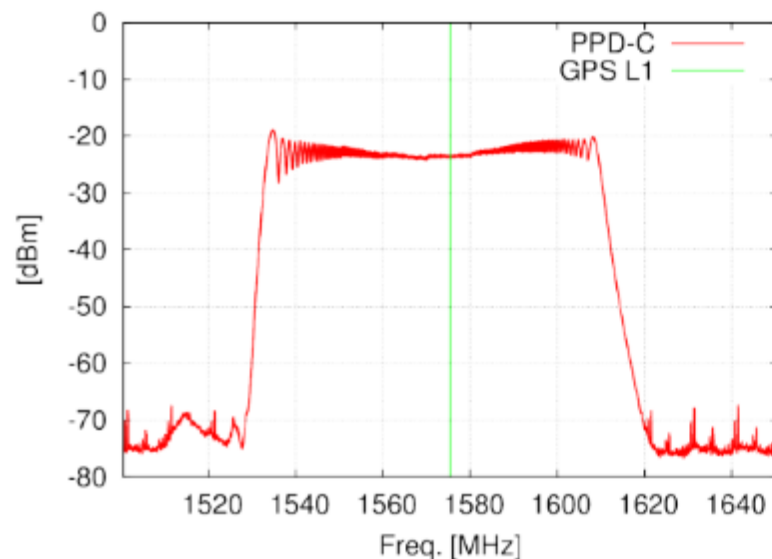
生のジャミング信号から引き算して打ち消す
→位相が合えばジャミングは減衰するはずだ（仮説）を
MATLAB（Simulink）上で試す



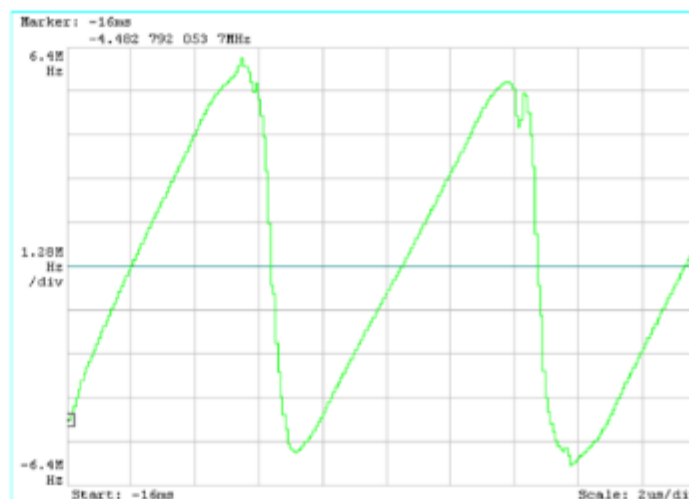
PPD：参考資料

PPDの周波数特性と変調

シガーソケット



中心周波数：1570.5 MHz
帯域幅：77.4MHz
出力：4.85 dBm



周波数変移: 11.3 MHz
変移周期: 8.4 us

【測位航法学会論文誌 2015 Vol.6 No.1】

福島 荘之介, 齊藤 真二

『PPD（個人用保護デバイス）の
地上型衛星航法補強システムへの影響』

PPDのジャミング信号はチャープ信号

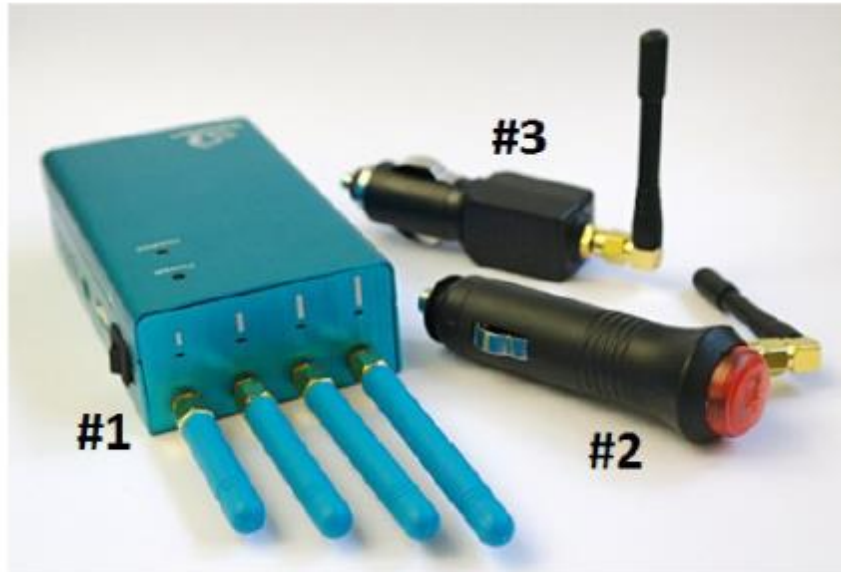
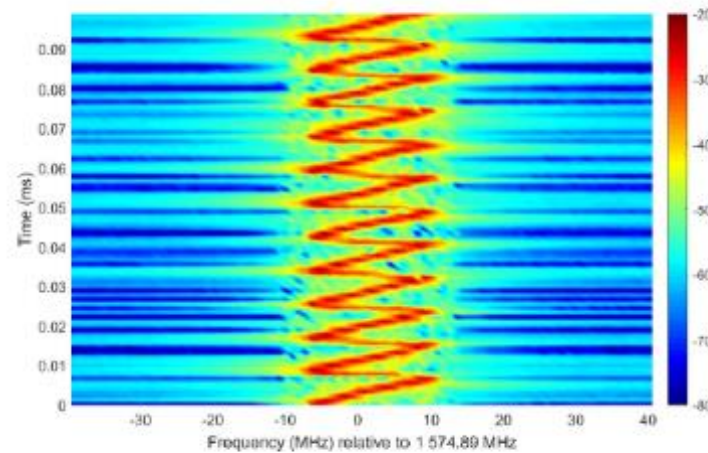
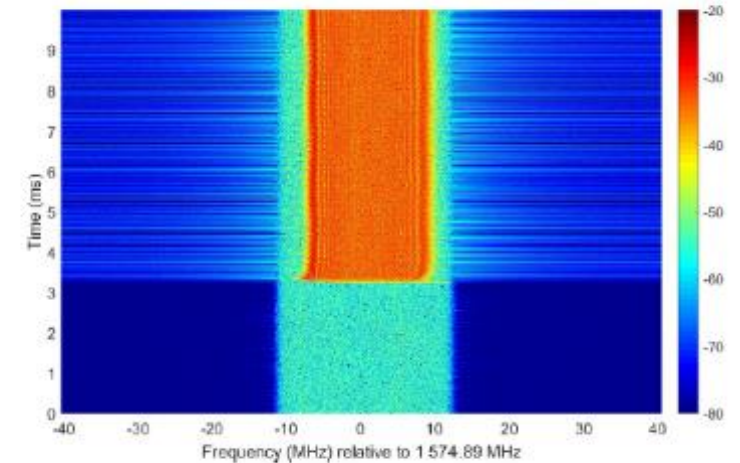


図1.研究に使用した3つのPPD



(a) PPD#1のウォーターフォール



(b) PPD#1の開始時のウォーターフォール

Evaluation of mitigation methods against COTS PPDs

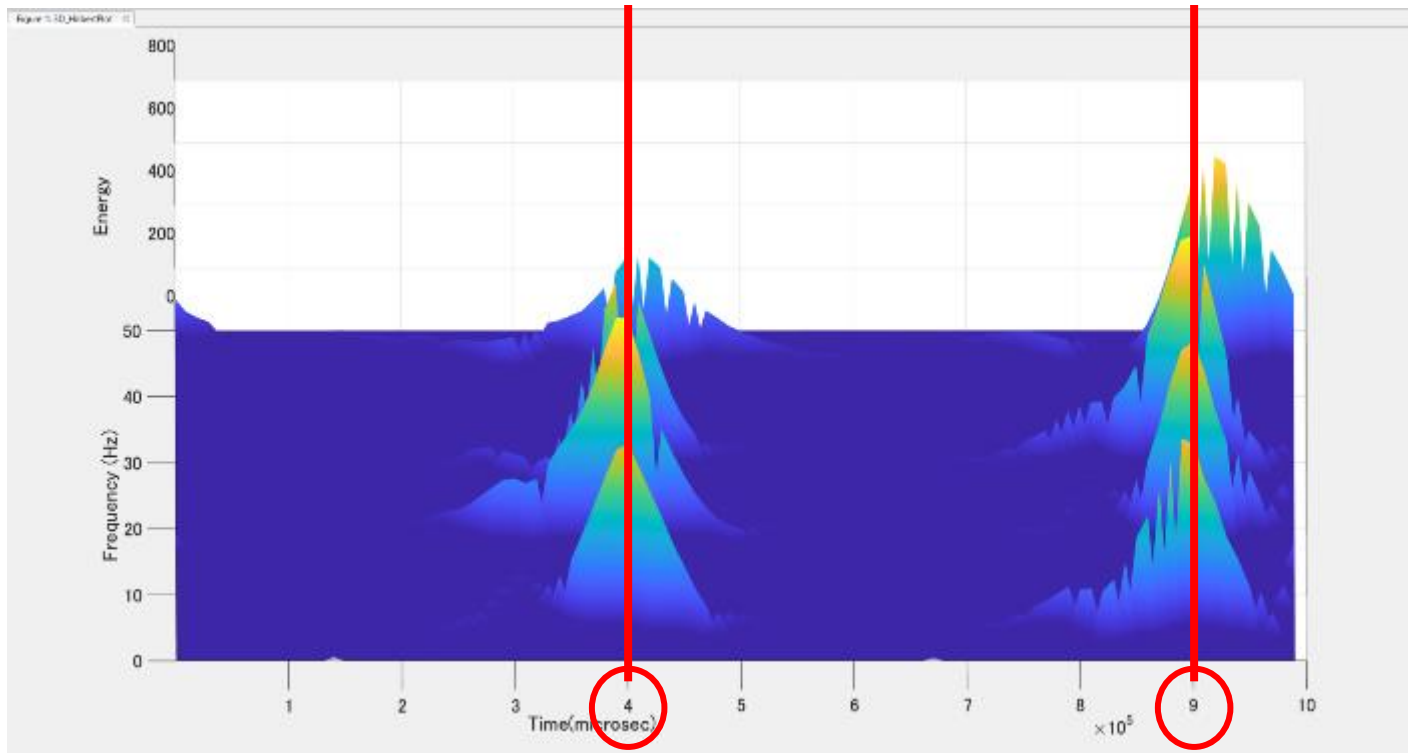
ION 2018 より引用

個体差のあるPPDの 周期をSDRで可視化するヒルベルト変換

$$f(t) = f_0 + kt \quad (t = 0 \sim T)$$

周期を把握することができる

➡周期を合わせて打ち消せるのではないか



時間のズレが合うまでループを回す

Acpのフラグが立つまで3 μ 秒ごとずらしていく。

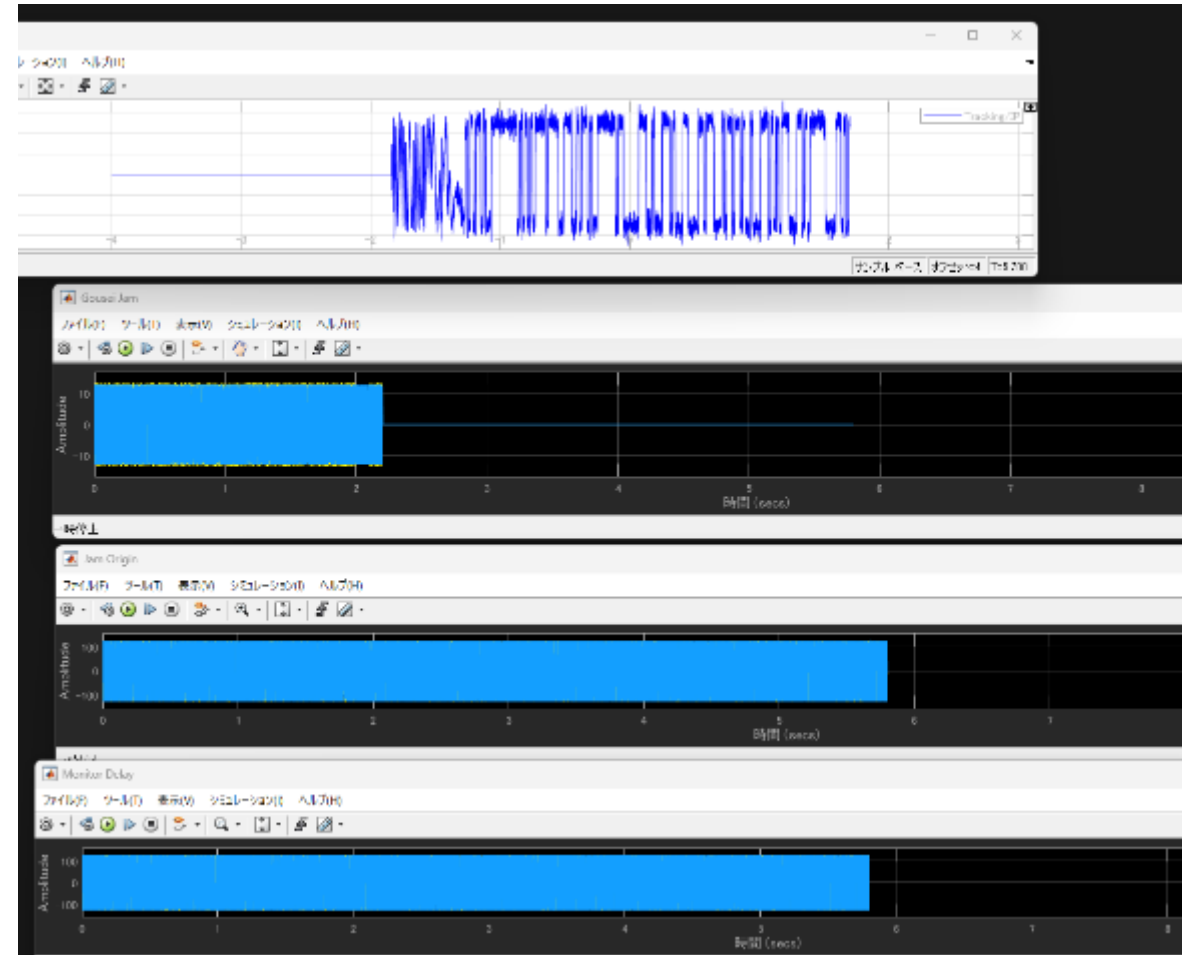
周期が合えば相殺が起こる。そこで固定して相殺を継続するアイデアをシミュレータで確認

何秒ごとに
遅延させるかは
最適化が必要（ここでは0.1秒毎に0.5 μ ）

結果：相殺タイミングが発生した

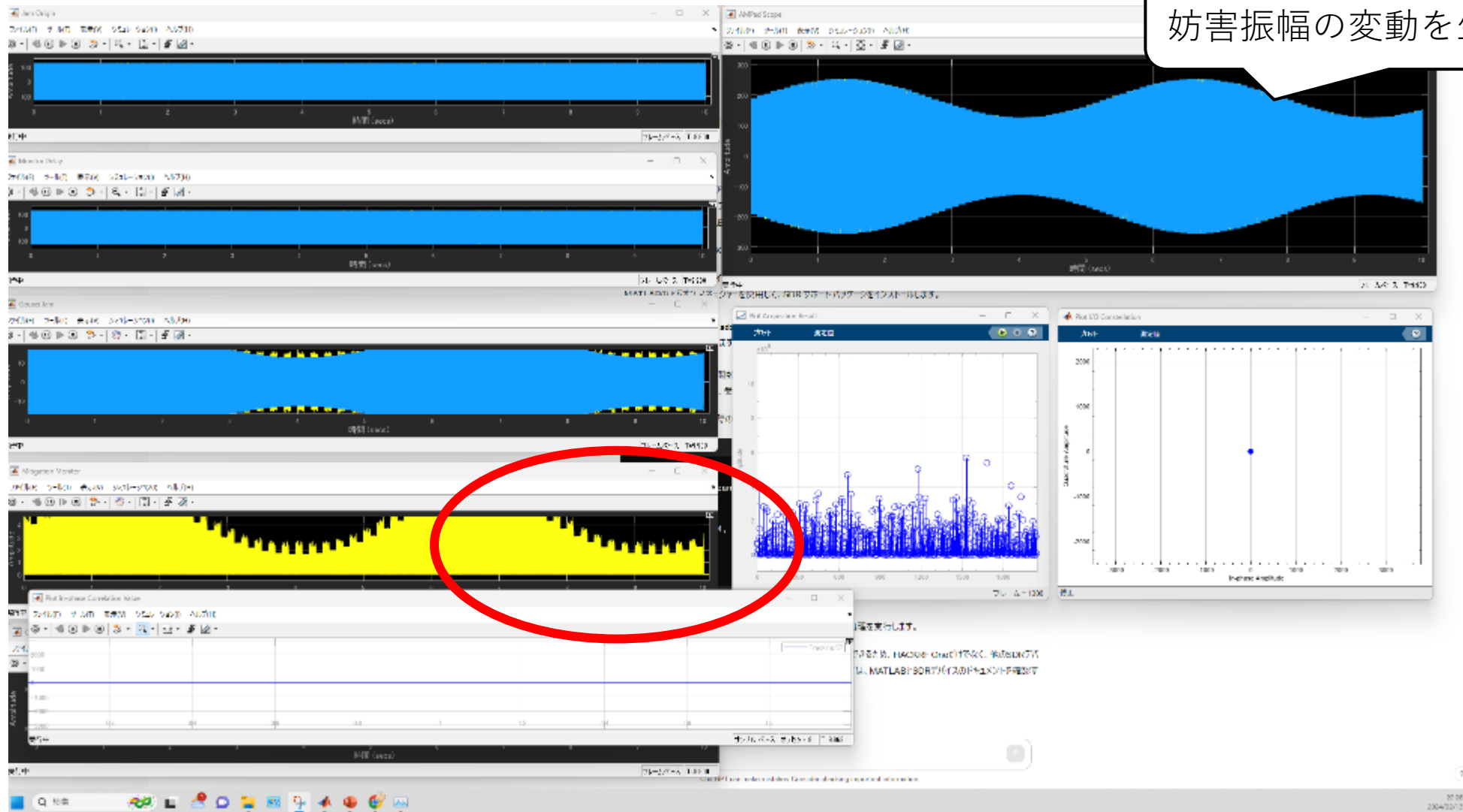
ただし、これが有効なのは振幅が
一致していることが必要

振幅も追従できるか？が次の課題



振幅が合わないと 減殺は起きず復調は発生しない

サインカーブで
妨害振幅の変動を生じさせている



振幅が一致すれば復調は成功する

振幅変化を把握できれば相殺が発生し復調を確認

オリジナル

レプリカ

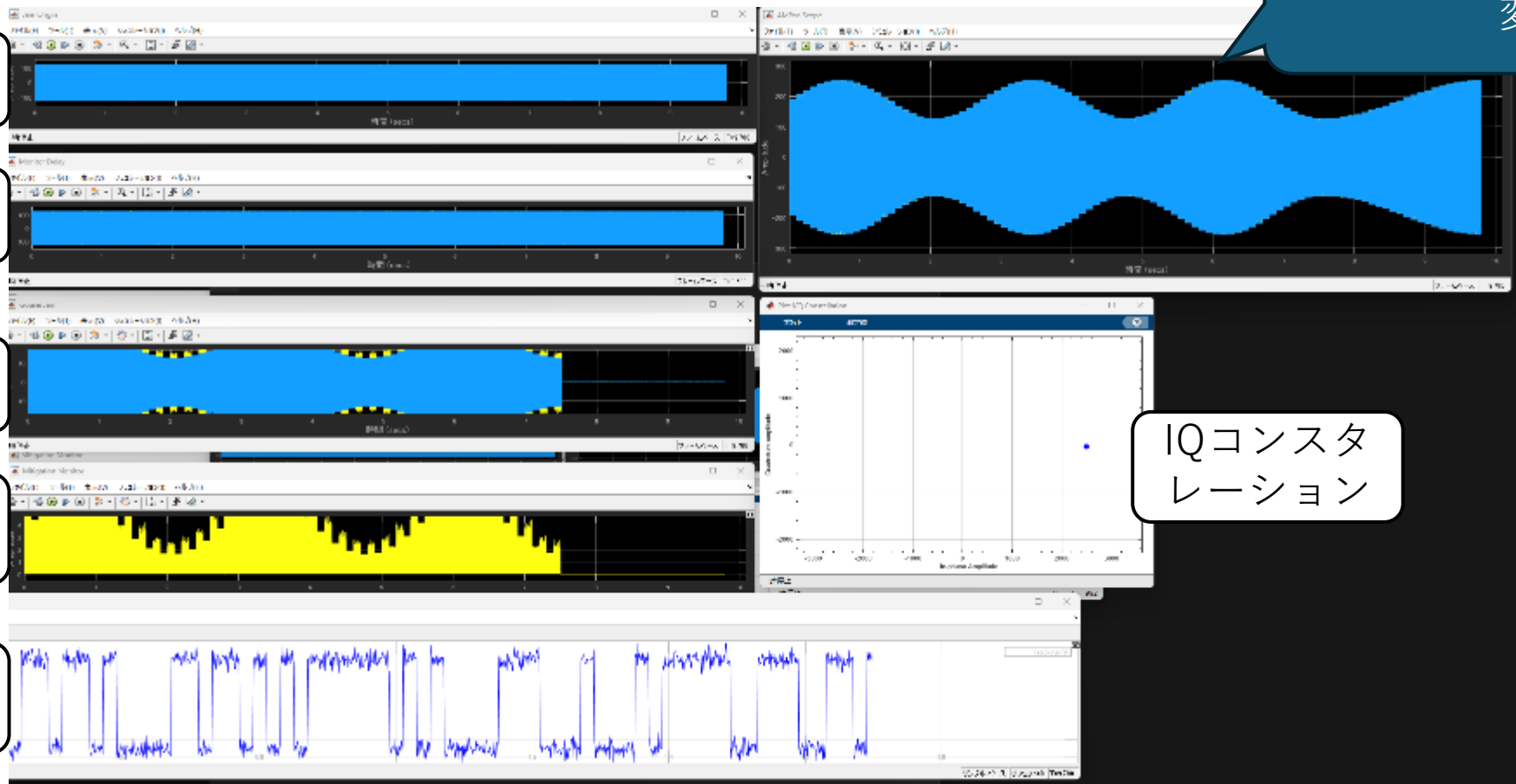
合成結果

合成結果
の絶対値

In-Phase
出力

ジャミングの振幅を
変動させる

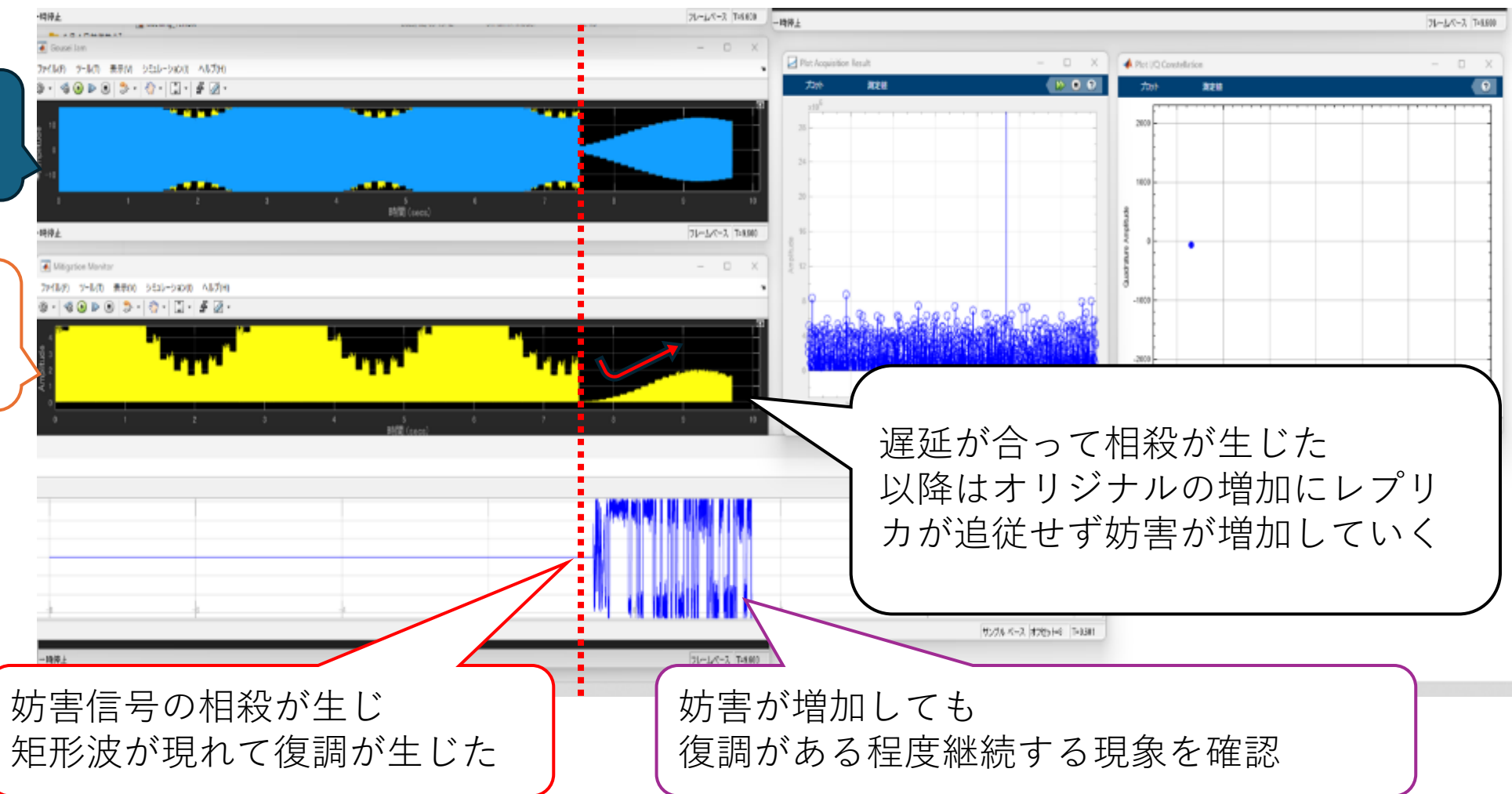
IQコンスタ
レーション



一度捕捉されれば多少ジャミングが増加しても復調が継続する

合成された
妨害信号

合成された
妨害信号の
絶対値



2
PRN Number

Baseband File Reader
GNSS Signal

z^{-1}

GPS signal Monitor

妨害信号の
振幅変化を作る

Baseband File Reader
Jam2

Jam Origin

AMP Origin

ampModulation

Sin AMP origin

AMPed Original Jam

Orig AMPed Scope

AMPed Original Jam

+

Gousei Jam Signal

Repli AMPed Jam Signal

Baseband File Reader
Jam1

Monitor Replica

Delay Timing Control

flagacp fcn

Delay Repeat

kalman filter AMP control

AMP

AMPed Original Jam

-

Repli AMPed Jam Signal

outputSignalToInt16ToDc

Gousei Jam Signal

kalmanFilter

z^{-1}

0.2

捕捉信号がくるまで
遅延量を調整するループ

カルマンフィルタでレプリカの振幅を制御するループ

動画による説明：

オリジナル
妨害信号
振幅変化させています

オリジナルとレプリカ
の妨害信号を
合成した出力

上記のグラフの
絶対値

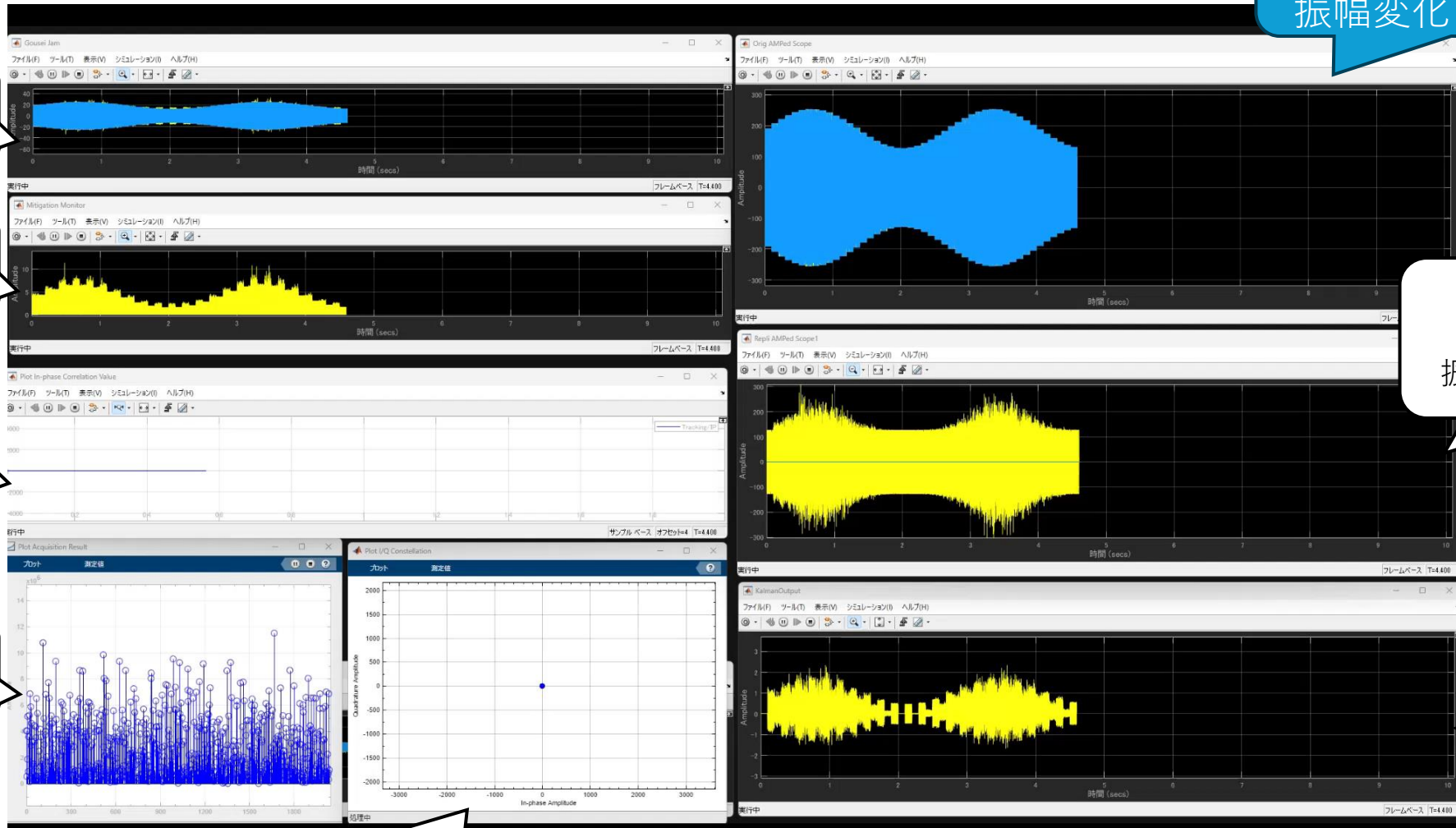
In-Phase
出力

ドップラー
周波数

レプリカ妨害信号
カルマンフィルタで
振幅追尾させています

カルマンフィルタ
の出力

IQ相



振幅の変化にカルマンフィルタで追従

カルマンフィルタでの追従を試行

振幅変化のない
オリジナルの
ジャミング

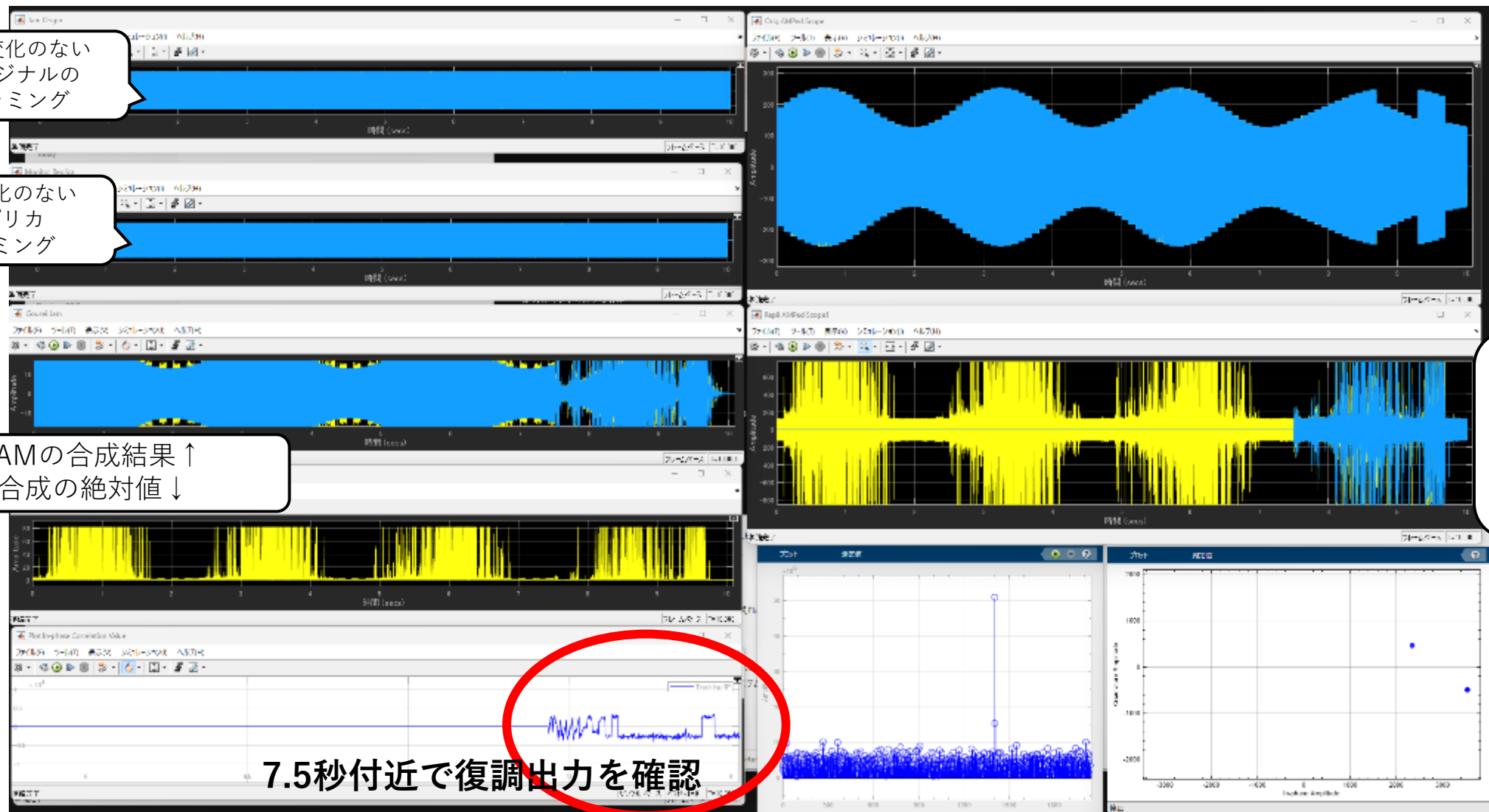
振幅変化のない
レプリカ
ジャミング

JAMの合成結果↑
合成の絶対値↓

振幅がサイン
で変化する
ジャミング

レプリカの振幅が
追従しようとして
変化している様子
がわかる

7.5秒付近で復調出力を確認



1. はじめに（研究背景）
2. 目的
3. 妨害再現実験
4. アンテナレベルでの軽減方法
5. 信号処理レベルでの軽減方法
6. まとめ

まとめ

【アンテナレベルでの低減策】

低仰角で到来する妨害電波を抑制かつ

高仰角の衛星信号をより強く受信できるビーム幅の狭い指向性アンテナを試作

- 課題
- ：試作ヘリカルアンテナの受信感度の向上
 - ：海上設置のための強度の確保と装備方法の検討が必要

【信号処理レベルでの低減策】

相殺するために遅延量と振幅を制御するための手法を試行

振幅と遅延を一致させることで、GNSS信号の妨害を低減できる可能性を実証

- 課題
- ：実空間での評価・試行実験が必要
 - ：カルマンフィルタ以外の制御方法（PID制御等）の検討が必要

遅延ループのコード

```
microDly_FlagIn_AMP_rAmpKalmancontrol2017_seikou ▶ Delay Repeat

1 function y = fcn(u, flagacp)
2     persistent delaySamples counter
3     Fs = 2.048e6; % サンプリング周波数 (2.048MHz)
4     microsec = 0.5; % ここで指定したμ秒ごとに遅延
5     holdTime = 0.1; % ここで指定した秒だけ遅延を保持
6
7     % flagacp が true の場合は何も処理せずに u をそのまま出力
8     if flagacp
9         y = u;
10        return;
11    end
12
13    % 初回呼び出し時に delaySamples を計算
14    if isempty(delaySamples)
15        delaySamples = round(Fs * microsec * 1e-6);
16        counter = 0;
17    end
18
19    % 出力行列を事前に初期化 (固定サイズ: 204800x1)
20    y = zeros(size(u), 'int16');
21
22    % 遅延と保持
23    if counter < Fs * holdTime
24        y(1+delaySamples:end) = int16(real(u(1:end-delaySamples)));
25        counter = counter + numel(u);
26    else
27        y = int16(real(u));
28        counter = 0;
29    end
30 end
```

カルマンフィルタのコード パラメータは手動入力しています

```
MATLAB Function1
microDly_FlagIn_AMP_rAmpKalmancontrol2017_seikou ▶ MATLAB Function1

1 function KalmanOut = kalmanFilter(error)
2     % サンプリング周波数
3     Fs = 2.048e6;
4
5     % 時間ベクトルの生成
6     t = (0:(1/Fs):(length(error)-1)*(1/Fs))';
7
8     % カルマンフィルタのパラメータ
9     Q = 2e-5; % プロセスノイズの共分散行列
10    R = 2e-2; % 観測ノイズの共分散行列
11    x_hat = zeros(2, 1); % 状態ベクトルの初期推定
12    P = eye(2); % 状態推定誤差の共分散行列
13
14    % カルマンフィルタ出力の初期化
15    KalmanOut = zeros(size(t));
16
17    % カルマンフィルタの計算
18    for i = 2:length(t)
19        % 予測ステップ
20        x_hat_minus = x_hat;
21        P_minus = P + Q;
22
23        % 更新ステップ
24        K = P_minus / (P_minus + R);
25        x_hat_minus = x_hat_minus + K * (error(i) - x_hat_minus(1));
26        P = (1 - K) * P_minus;
27
28        % カルマンフィルタ出力の計算
29        KalmanOut(i) = -real(x_hat_minus(1));
30    end
31 end
32
```

改良版 外部でのQ・R設定と ローパスフィルタの追加

